



**Universidade dos Açores – Departamento de Ciências Agrárias**

# **Aproveitamento Energético num Sistema de Distribuição de Água**

**César Miguel da Rocha Cota**

**Projeto para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão de  
Sistemas de Água**

**Orientador:**

Professor Doutor José Carlos Goulart Fontes

**Coorientador:**

Professor Doutor José Gabriel do Álamo de Meneses

Abril de 2015

Nunca nos é dado um sonho sem também nos ser dada a possibilidade de o realizar...

<Richard Bach>

## Agradecimentos

Serve o presente momento para homenagear e agradecer todas as pessoas e instituições que contribuíram, de forma direta e indireta, para a elaboração e sucesso deste projeto.

Ao Professor Doutor José Carlos Goulart Fontes, pela sua orientação do projeto.

Ao Professor Doutor José Gabriel do Álamo de Meneses, pela coorientação do projeto.

Aos Serviços Municipalizados de Angra do Heroísmo, pelos dados fornecidos.

Ao Engenheiro César Pires dos SMAH, pelo seu empenho em fornecer todos os dados necessários e por esclarecer todas as minhas dúvidas.

Ao Engenheiro Huberto Bettencourt dos SMAH, pelos dados fornecidos.

À MLA I&D, empresa na qual trabalho, por me dar liberdade e tempo para me dedicar a este projeto.

À Mónica, que sem seu apoio e insistência teria sido impossível realizar este trabalho.

À minha família e amigos, pelo apoio, incentivo e crença em mim.

Aos quais estou eternamente grato.

## **Abstract**

In water supply systems, there are points where the pressure inside the pipes is excessive and, for adjustment or control of such pressure, the network is divided into zones, by pressure levels, via pressure drop chambers or pressure reducing valves, where the hydraulic energy in excess is dissipated or totally lost.

In this project, it is studied the possibility of using hydraulic energy dissipated in the water distribution network of Angra do Heroísmo municipality, to generate electric energy. To this end, there was made a survey of the total load at the entrance of the pressure drop chambers, pressure reducing valves and reservoirs of water distribution network of water from Angra do Heroísmo municipality. According to the data collected, the reservoir of Vinha Brava showed the higher amount of dissipated energy. Chosen the best location on the network, was dimensioned the electricity production equipment with 45 kW of power. It was made an estimate for the annual production of electric energy of 142,404 kWh/year and with this information it was made an economic study where the expenses and dividends obtained from the energy produced are analyzed, concluding that the project is economically viable for a time of operation higher than 10 years, and at the price paid for the electricity from endogenous sources in the Azores, such an investment could have a amortization period of 2.3 years.

Keywords: Head loss chambers; Energy; Energy Production; Reservoirs; Turbine; Pressure reducing valves.

## **Resumo**

Nos sistemas de distribuição de água existem pontos onde a pressão no interior das condutas é excessiva e, para a regularização ou controlo dessa pressão, recorre-se à divisão da rede em zonas, por patamares de pressão, através de câmaras de perda de carga ou válvulas reguladoras de pressão, onde a energia hidráulica em excesso é dissipada ou totalmente perdida.

Neste projeto, estuda-se a possibilidade de aproveitar a energia hidráulica dissipada na rede de distribuição de água do concelho de Angra do Heroísmo, para gerar energia elétrica. Para tal, fez-se um levantamento da carga total à entrada nas câmaras de perda de carga, válvulas reguladoras de pressão e reservatórios de água da rede de distribuição de água do concelho de Angra do Heroísmo. De acordo com os dados recolhidos, o reservatório da Vinha Brava foi o que apresentou uma maior energia dissipada. Escolhido o melhor local da rede, dimensionou-se o equipamento de produção de energia elétrica com 45 kW de potência. Fez-se uma estimativa para a produção anual de energia elétrica de 142 404 kWh/ano e com esta informação fez-se um estudo económico onde se analisa as despesas e os dividendos obtidos com a energia produzida, concluindo-se que o projeto é economicamente viável para um tempo de operação superior a 10 anos, e que, ao preço pago pela energia elétrica proveniente de fontes endógenas na Região Autónoma dos Açores, um investimento deste tipo poderá ter um período de amortização de capital de 2,3 anos.

Palavras-chave: Camaras de perda de carga; Energia; Produção de Energia; Reservatórios; Turbina; Válvulas reguladoras de pressão.

## Índice

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Objetivos .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. Metodologia.....</b>	<b>2</b>
<b>2. Revisão bibliográfica .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Introdução.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Centrais hidroelétricas .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3. Principais tipos de turbinas .....</b>	<b>9</b>
<b>2.3.1. Turbinas Pelton .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.2. Turbina de Turgo .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.3. Turbina de fluxo cruzado.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.4. Turbinas Francis .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.5. Turbinas hélice.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.6. Turbinas Kaplan.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.7. Turbinas bolbo.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3. Outros componentes de uma central hídrica .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.1. Reguladores de velocidade .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.2. Geradores elétricos .....</b>	<b>15</b>
<b>2.5. Rede de distribuição de água .....</b>	<b>17</b>
<b>2.5.1. Reservatórios .....</b>	<b>17</b>
<b>2.5.2. Câmaras de Perda de Carga .....</b>	<b>18</b>
<b>2.5.3. Válvulas reguladoras de pressão .....</b>	<b>18</b>
<b>3. Enquadramento territorial .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1. Produção e consumo de energia elétrica na ilha Terceira .....</b>	<b>22</b>
<b>4. Desenvolvimento do Projeto .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1. Câmaras de perda de carga (CPC).....</b>	<b>26</b>
<b>4.2. Válvulas Reguladoras de Pressão (VRP) .....</b>	<b>27</b>
<b>4.3. Reservatórios .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1. Potência disponível nas câmaras de perda de carga, nas válvulas de perda de carga e reservatórios .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2. Seleção do local a instalar a micro-turbina.....</b>	<b>33</b>
<b>4.3. Reservatório da Vinha Brava (R4).....</b>	<b>36</b>
<b>4.4. Escolha do equipamento .....</b>	<b>40</b>
<b>4.5. Cálculo da energia útil .....</b>	<b>42</b>
<b>4.6. Enquadramento legal .....</b>	<b>47</b>
<b>4.6.1. Produção de energia elétrica.....</b>	<b>47</b>

4.6.2. Incentivos ao investimento .....	49
4.7. Estudo económico .....	51
5. Conclusão .....	55
6. Referências Bibliográficas .....	58
7. Anexos .....	63
7.1. Anexo I – Proposta apresentada pela Canyon Hydro .....	63

## Índice de Tabelas

Tabela 1- Classificação das centrais hídricas quanto à potência instalada (Castro, 2002) .....	6
Tabela 2- Classificação das centrais hídricas quanto à altura de queda de água (Castro 2002) ...	7
Tabela 3- Consumo de água por sector no concelho de Angra do Heroísmo em 2013 (SREA 2015) .....	21
Tabela 4- Centrais de produção de energia elétrica na ilha Terceira (EDA, 2015) .....	22
Tabela 5- Camaras de Perda de Carga existentes no Concelho de Angra do Heroísmo (SMAH, 2014) .....	26
Tabela 6- Válvulas Reguladoras de Pressão existentes no concelho de Angra do Heroísmo (SMAH, 2014) .....	27
Tabela 7- Reservatórios existentes no concelho de Angra do Heroísmo (SMAH, 2014) .....	29
Tabela 8- Cálculo da potência nas CPC, com base na equação 1 e nos dados de caudal fornecidos pelos SMAH. ....	30
Tabela 9- Cálculo da potência nas VRP com base na equação 1 e nos dados de caudal fornecidos pelos SMAH. ....	31
Tabela 10 - Cálculo da potência nos reservatórios com base na equação 1 e nos dados de caudal fornecidos pelos SMAH .....	32
Tabela 11- Caudal efluente do R4 a cada hora entre os dias 25 a 30 de Março de 2015 (SMAH, 2015) .....	37
Tabela 12- Potência absorvida no R4 entre nos dias de 25 a 29 de Março de 2015.....	38
Tabela 13- Potência absorvida no R4 entre nos dias de 28 a 30 de Março de 2015.....	39
Tabela 14- - Rendimento do grupo Turbina-gerador em função da carga .....	41
Tabela 15- Cálculo da potência útil do grupo turbina-gerador no dia 26 de Março de 2015 .....	42
Tabela 16 - Cálculo da potência útil do grupo turbina-gerador no dia 27 de Março de 2015 ....	43
Tabela 17- Cálculo da potência útil do grupo turbina-gerador no dia 28 de Março de 2015 .....	43
Tabela 18 - Cálculo da potência útil do grupo turbina-gerador no dia 29 de Março de 2015 ....	44
Tabela 19- Consumo de energia elétrica no furo da Vinha Brava no ano de 2014 (SMAH, 2015) .....	45
Tabela 20- Relação entre a quantidade de água consumida no mês de maior consumo e os restantes meses no concelho de Angra do Heroísmo no ano de 2013 .....	45
Tabela 21- Estimativa da energia a produzir no reservatório R4 com base nos valores calculados na tabela 16 .....	46
Tabela 22- Estimativa corrigida da quantidade de energia a produzir no reservatório da Vinha Brava (R4).....	47
Tabela 23-Custos do equipamento de produção e injeção de energia e estimativa de custos de construção da casa de máquinas. ....	52
Tabela 24- Dividendos a receber em função do preço da energia elétrica .....	52
Tabela 25- Tempo de recuperação do investimento consoante dos vários cenários apresentados .....	53
Tabela 26- Custo do MWh de energia produzida em função do tempo de operação .....	54



## Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema de uma central a fio de água ( <a href="http://www.quora.com">http://www.quora.com</a> 8/4/2015).....	8
Figura 2 - Esquema de uma central hidroelétrica com albufera .....	8
Figura 3- Esquema de uma turbina Pelton ( <a href="http://www.waterwheelfactory.com">http://www.waterwheelfactory.com</a> 8/4/2015).....	9
Figura 4 - Curva de eficiência característica de uma turbina Pelton (Tamburrini 2004) 10	
Figura 5- Esquema de uma turbina Turgo em comparação com uma turbina Pelton ( <a href="http://tanasui.co.jp/">http://tanasui.co.jp/</a> 8/4/2015) .....	11
Figura 6- Esquema de uma turbina de fluxo cruzado ( <a href="http://tanasui.co.jp/">http://tanasui.co.jp/</a> 8-4-2015)... 11	
Figura 7- Curva de eficiência característica de uma turbina Francis (Tamburrini 2004). .....	12
Figura 8- Esquema de uma turbina de hélice ( <a href="http://www.see.ed.ac.uk/">http://www.see.ed.ac.uk/</a> 8/4/2015).....	13
Figura 9- Esquema de uma turbina Kaplan ( <a href="http://html.rincondelvago.com/">http://html.rincondelvago.com/</a> 8/4/2015) 13	
Figura 10- Curva de eficiência típica de uma turbina Kaplan (Tamburrini 2004). .....	14
Figura 11 - Esquema de uma turbina tipo bolbo ( <a href="http://www.caballano.com">http://www.caballano.com</a> 8/4/2015) 14	
Figura 12- Gráfico para seleção da turbina ( <a href="http://www.pumpfundamentals.com/">http://www.pumpfundamentals.com/</a> 9/4/2015).....	17
Figura 13- Mapa da ilha Terceira com divisão entre os dois concelhos da ilha .....	19
Figura 14- Localização das Câmaras de perda de Carga existentes na cidade de Angra do Heroísmo (SMAH, 2015) .....	20
Figura 15- Localização dos Reservatórios existentes na cidade de Angra do Heroísmo (SMAH, 2015) .....	20
Figura 16- Localização das Válvulas reguladoras de pressão existentes na cidade de Angra do Heroísmo (SMAH, 2015) .....	21
Figura 17-Evolução do consumo de energia elétrica na ilha Terceira durante o ano de 2013 (EDA, 2015 ) .....	23
Figura 18- Evolução dos valores mensais da Ponta Máxima e Vazio durante o ano de 2013 na ilha Terceira (EDA, 2014) .....	23
Figura 19- Diagrama de carga característico para a Primavera na Ilha Terceira (EDA, 2014).....	24
Figura 20- Diagrama de carga característico para o Verão na Ilha Terceira (EDA, 2014) .....	24
Figura 21- Diagrama de carga característico para o Outono na Ilha Terceira (EDA, 2014).....	25
Figura 22- Diagrama de carga característico para o Inverno na Ilha Terceira (EDA, 2014).....	25
Figura 23 - Localização dos Reservatórios R4 e R23, CPC CPC38 e CPC 49 e da VRP RP33 (SMAH, 2015) .....	34
Figura 24- Localização do reservatório R10 (imagem retirada de Google Earth a 9/4/2015, localização identificada com base nos dados fornecidos pelos SMAH) .....	34
Figura 25- Pormenor da localização do reservatório R23 (SMAH, 2015) .....	35
Figura 26- Pormenor da localização do reservatório R4 (SMAH, 2015).....	36

Figura 27- Caudal efluente no reservatório R4 entre os dias 25-30 de Março de 2015 (SMAH, 2015).....	38
Figura 28- Potência absorvida no R4 entre as 00h30 e as 23h30 dos dias 26 a 29 de Março de 2015.....	40
Figura 29- Curva de rendimento do grupo turbina-gerador Canyon Hydro .....	41

## Lista de símbolos e siglas

CMH – Central mini hídrica

CPC – Câmara de perda de carga

FEDER – Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

$H_u$  – Queda útil

m.c.a. – Metro de coluna de água (1 m.c.a. = 9800 Pa)

$P_a^t$  – Potência absorvida pela turbina

PME – Pequenas e médias empresas

PLC – Controlador Lógico Programável

$P_u^t$  – Potência útil da turbina

Q – Caudal

SIDER – Sistema de Incentivos para o Desenvolvimento Regional dos Açores

SMAH - Serviços Municipalizados de Angra do Heroísmo

VRP – Válvula reguladora de pressão

### 1. Introdução

A água é um recurso essencial às atividades humanas, por isso, ao longo dos tempos foram sendo desenvolvidos sistemas de captação, tratamento e distribuição de água conforme as necessidades das populações iam obrigando.

No concelho de Angra do Heroísmo, onde se foca este estudo, existe atualmente uma rede de distribuição de água com alguma complexidade, que obedece a rigorosos padrões de qualidade. A finalidade deste sistema é levar à população do concelho a água necessária às suas atividades, todavia, com este projeto, vêm-se acrescentar outro uso à rede de Angra do Heroísmo, com a produção de energia elétrica a partir da água que nela circula.

Na atual conjuntura, onde o preço dos combustíveis fósseis é cada vez mais alto, torna-se imperativo a identificação e avaliação de todos os desperdícios energéticos e a opção por fontes de energia endógenas.

A energia hidroelétrica, de grande e pequena escala, é uma das mais importantes fontes de energia renovável a nível mundial, contribuindo com 19 % da eletricidade do planeta (Parish, 2002), onde os aproveitamentos hidroelétricos vão desde as grandes barragens até uma escala tão reduzida como o aproveitamento hidroelétrico numa rede de abastecimento de água (Zainuddin *et al.*, 2009).

Nos últimos anos as centrais hídricas de pequena escala têm vindo a tornar-se uma boa solução para o abastecimento de energia elétrica a localidades que ficam longe da rede elétrica e também como uma solução barata em países em vias de desenvolvimento (Hermann, 2006) uma vez que se trata de uma tecnologia relativamente bem desenvolvida, simples e com baixos custos, quer económicos, quer ambientais (Kapoor, 2013).

A redução de desperdícios de energia e utilização de recursos renováveis trás significativos benefícios ambientais e contribui para o desenvolvimento sustentável. O conceito de sustentabilidade, tal como o conhecemos hoje, surgiu na década de 80 através do Relatório de Brundtland, que referia que o “desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que satisfaz as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras em satisfazerem as suas próprias necessidades” (Arieiro, 2008).

No sentido de travar as alterações climáticas provocadas pelo excesso de produção de gases com efeito de estufa, vários entendimentos têm sido realizados entre diversos

países, tendo sido criada legislação com o objetivo de diminuir a poluição e incentivar a eficiência energética e o uso de energias renováveis.

É de destacar o Protocolo de Quioto da Convenção das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas que foi discutido e negociado em 1997 e entrou em vigor em Fevereiro de 2005. Este protocolo veio comprometer todas as partes envolvidas (175 países) não só a limitar como a reduzir os gases com efeito de estufa, assim como a promover um desenvolvimento sustentável (Seiffert 2009).

Portugal, um dos países signatários do Protocolo de Quito, depende fortemente de recursos energéticos importados, nomeadamente petróleo bruto, carvão e gás natural, sendo cerca de 85 % da energia primária consumida em Portugal proveniente destes combustíveis fósseis. Esta situação faz com que o nosso país esteja demasiado exposto à conjuntura internacional, suportando imediatamente as consequências das variações dos preços dos combustíveis (REN, 2006).

Nos Açores o cenário é muito semelhante, sendo a maior parte da energia utilizada proveniente de combustíveis fósseis (SREA, 2015), acarretando ainda as dificuldades provenientes do transporte dos combustíveis para a região e a distribuição inter-ilhas.

### **1.1. Objetivos**

Neste trabalho faz-se o estudo de um o possível aproveitamento de energia na rede de distribuição de água do concelho de Angra do Heroísmo de forma a inventariar os pontos da rede onde é possível aproveitar a energia do escoamento para a transformar em energia elétrica, identificando os locais com maior potencial. Com este trabalho também se pretende dimensionar um sistema de aproveitamento de energia e estudar a sua viabilidade económica.

### **1.2. Metodologia**

A primeira fase deste projeto consiste essencialmente revisão bibliográfica e pesquisa sobre o estado da arte, onde é feita uma breve pesquisa sobre os conceitos básicos da hidroeletricidade e também se procura saber como e onde foram realizados projetos deste género. Numa segunda fase fez-se um levantamento da rede de distribuição de Angra do Heroísmo, localizando as câmaras de perda de carga, válvulas reguladoras de pressão e

## **1. Introdução**

reservatórios da rede de distribuição de água, além dos caudais e carga hidráulica nas condutas afluentes, Este levantamento foi feito pelos Serviços Municipalizados de Angra do Heroísmo (SMAH) que disponibilizaram toda a informação acerca da rede de distribuição de água de Angra do Heroísmo. Numa terceira fase, a partir dos dados fornecidos pelos SMAH, estuda-se qual o local com maior potencial para implementar sistema de produção de energia elétrica e posteriormente faz-se um dimensionamento de um sistema de transformação da energia hidráulica numa câmara de perda de carga, reservatório ou válvula reguladora de pressão, em energia elétrica. O aproveitamento elétrico é feito através do uso de uma mini, micro ou pico turbina convencional, escolhida conforme as características de carga e caudal da água efluente, a instalar no local com maior potencial. O uso a dar à eletricidade produzida deverá ser escolhido conforme a quantidade produzida, sendo possível o autoconsumo, em equipamentos da rede de distribuição ou vendida à rede elétrica.